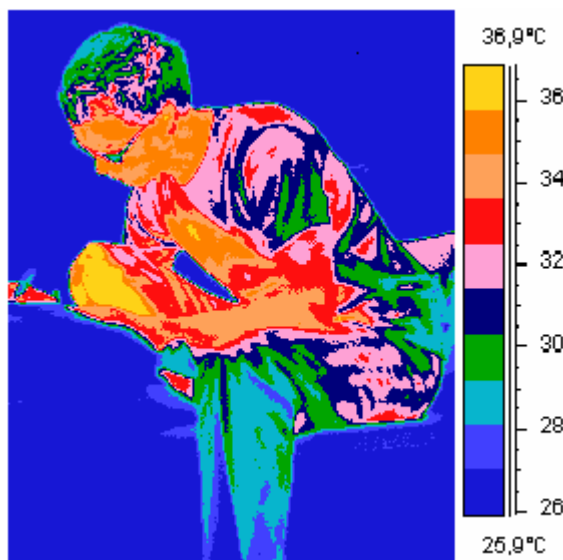


Energiehaushalt und Temperaturregulation

B. Wärmehaushalt und Temperaturregulation

H.E. Koralewski



4. Wärmebildung und Wärmetransport

Die Stoffwechselprozesse lebender Organismen folgen thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten und sind so stets auch mit einer Wärmeerzeugung verbunden. Die Geschwindigkeit, mit der dieser Energieumsatz abläuft, und damit die Stoffwechselintensität (Stoffwechselrate), ist aber andererseits wiederum auch temperaturabhängig. Dabei gilt die von van't Hoff angegebene Reaktions-Geschwindigkeits-Temperatur-Regel (**RGT-Regel**). Sie beschreibt die bei biochemischen Prozessen bestehende Abhängigkeit von Reaktionsgeschwindigkeit und Temperatur.

$$Q_{10} = k_{(T+10)} / k_{(T)} .$$

Der als Q_{10} bezeichnete Quotient ist das Verhältnis der Reaktionsgeschwindigkeiten (k) bei 10° Temperaturunterschied.

Typisch für biologische Prozesse sind Q_{10} -Werte zwischen 2 und 3. D.h. eine Senkung der Temperatur um 10° reduziert auch den Energieverbrauch (P) um den Faktor 2 bis 3 gemäß:

$$P_1/P_2 = Q_{10}^{(T_1 - T_2) / 10} .$$

4.1 Wärmebildung

Im Organismus wird u.a. durch den schrittweisen Abbau von Nährstoffen Energie frei, die dann von den Zellen teilweise zum Aufbau von ATP verwendet wird. (ATP wird für die spezifische Zelltätigkeit benötigt). Der weitaus größere Teil (ca. 75%) wird allerdings in Wärme umgesetzt. Wärme ist sozusagen Nebenprodukt bei allen Stoffwechselprozessen (**exotherme chemische Reaktionen**). Der Energieumsatz und damit auch die Wärmeproduktion variiert je nach Arbeitsintensität, Umgebungstemperatur, Nahrungsaufnahme und Tageszeit. (S. hierzu auch Teil A. Energiehaushalt.) Jede Muskelbewegung ist mit einer **mechanischen Reibung** verbunden, die in Wärme umgesetzt wird. Einen weiteren, wenn auch sehr geringen Anteil an der Wärmebildung haben die elektrischen Vorgänge in Nerven und Muskeln, wo geringe Ströme durch elektrisch leitende Gewebe fließen. Nicht in Wärme umgesetzt wird die Stoffwechselenergie, die:

1. zum Substanzaufbau eingesetzt wird (Wachstum, Muskelaufbau, Fetteinlagerung etc.),
2. als mechanische Arbeit (potentielle und kinetische Energie) an die Umwelt abgegeben wird.

4.1.1 Zitterfreie Wärmebildung

An der Gesamtwärmebildung des Menschen sind die einzelnen Körperorgane je nach Stoffwechselaktivität des Organismus unterschiedlich beteiligt (s. Abb.1a). Bei einer Raumtemperatur von 27-31°C (Thermoneutral-Zone) deckt die Ruhewärmebildung eines unbedeckten Erwachsenen gerade den Wärmeverlust über die Körperschale, sodaß die Körperkerntemperatur konstant bleibt. Beim Säugling muß die Raumtemperatur unter gleichen Bedingungen in der 1. Woche mindestens 34°C betragen (ungünstigeres Verhältnis zwischen Körperoberfläche und Körpermasse). Hier trägt in den ersten Lebenswochen das Braune Fettgewebe mit dazu bei, den Wärmehaushalt zu stabilisieren.

Es beträgt Anfangs bis zu 5% des Körpergewichts und besteht aus mitochondrienreichem

Gewebe mit hoher Oxydationsrate. Metabolismus und ATP-Produktion sind entkoppelt und die Mitochondrienaktivität dient allein der Wärmebildung. Dieser Vorgang wird über β_3 -Rezeptoren durch Noradrenalin angeregt. Beim Erwachsenen gibt es nur noch rudimentäre Spuren dieses Gewebetyps in cervicalen, pericardialen und perirenal Fettdepots.

Anders ist das bei heterothermen Säugetieren (s. Kapitel 5), die interscapular größere Depots braunen Fettgewebes besitzen. Das wird benötigt für ein schnelles Aufwärmen des Körpers beim Erwachen aus der Kältestarre.

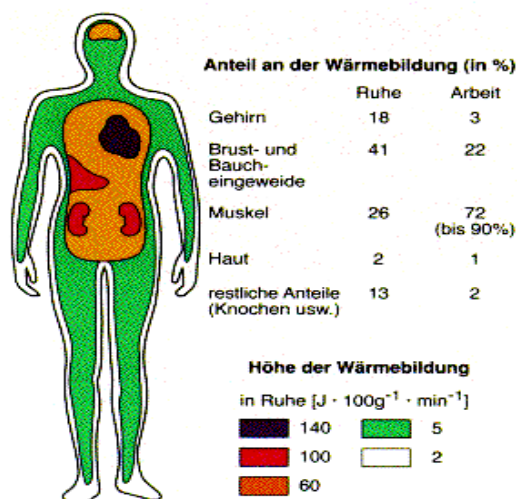


Abb.1 (Deetjen Speckmann, Physiologie 3.Auflage 1999)

4.1.2 Kältezittern

Die über das somatische Nervensystem von Zentral ausgelöste unwillkürliche, rhythmische Tonussteigerung der Skelettmuskeln führt zu einer massiven Wärmebildung (Wirkungsgrad ca. 75%). Der Grundumsatz kann so durch Kältezittern um das 4-fache gesteigert werden.

4.1.3 Körperliche Bewegung

Bei der willkürlichen Aktivierung der Skelettmuskulatur (z.B. Bewegung, körperliche Arbeit) wird zum einen durch die Stoffwechselaktivität Wärme produziert, hinzu kommt ein geringerer Anteil an Reibungswärme. Im Extremfall hat die Muskulatur einen Anteil von bis zu 90% an der Gesamtwärmebildung des Körpers.

4.2 Körpertemperatur

Die Körpertemperatur des Menschen ist differenziert zu betrachten. Während die Temperatur im Inneren von Rumpf und Kopf annähernd konstant gehalten wird (**Kerntemperatur**), kann sie im Bereich der Extremitäten und der Haut und den darunter liegenden Schichten (**Schalentemperatur**) stärker variieren. Das Temperaturfeld des unbedeckten menschlichen Körpers ändert sich in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur, wie es in der nebenstehenden Abb.2 angedeutet ist. Es zeigt die Isothermen des ruhenden, unbedeckten Menschen bei 20°C und 35°C Lufttemperatur. Der helle Bereich umschreibt die Körperschale, der dunkle Bereich entspricht dem Körperkern.

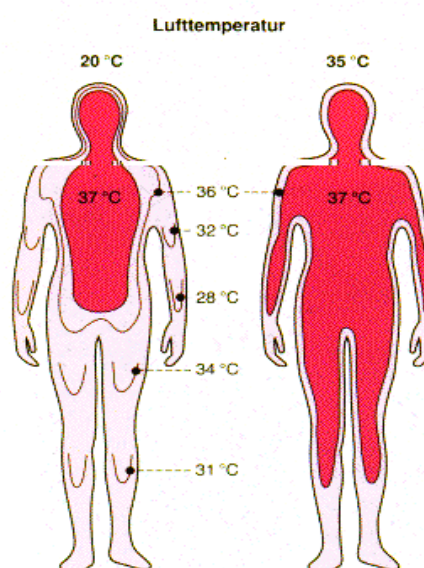


Abb.2 (aus:Deetjen Speckmann, Physiologie 3.Auflage 1999)

4.2.1 mittlere Hauttemperatur

Wie in Abb.2 dargestellt, werden an der Körper-Oberfläche je nach Messort unterschiedliche Hauttemperaturen gemessen. Dabei ist die Temperaturfeldverteilung abhängig von der Umgebungstemperatur. Um hieraus die mittlere Hauttemperatur zu erhalten, wurden von Astrand

et.al. für repräsentative Messorte Flächenfaktoren bestimmt. Die Flächenanteile an der Gesamtkörperoberfläche sind für die entsprechenden Körperteile nachfolgend aufgeführt:

Körperteil	Meßpunkt	Flächenfaktor F
Kopf	Stirn	0,07
Arme	Unterarm, innen	0,14
Hände	Handflächen	0,05
Füße	Fußsohlen	0,07
Beine	Oberschenkel, innen	0,19
	Wade/ Schienbein	0,13
Rumpf	Sternum	0,175
	Abdomen	0,175

Die Temperaturen an den Messorten werden mit dem zugehörigen Flächenfaktor multipliziert. Die Summe aller Produkte ergibt schließlich den Wert der mittleren Hauttemperatur, der als **Schalentemperatur** bezeichnet wird.

Die Flächenfaktoren (Nach: Astrand, Rodahl, Textbook of Work Physiology, 1970 McGraw-Hill) werden im Praktikum verwendet sowohl bei der Bestimmung der mittleren Hauttemperatur, als auch bei der Berechnung des Gesamt-TEWL (Transepidermaler Wasserverlust).

4.2.2 Messung der Körpertemperatur

Für die Bestimmung der Temperatur eines flüssigen oder festen Mediums muß Wärme auf den Messfühler übertragen werden. Dies kann durch direkten Kontakt (Konduktion) oder durch Strahlung (Radiation) erfolgen. **Kontaktthermometer** wie Thermistoren, Halbleiterwiderstände oder Flüssigkeitsthermometer wie z.B. Quecksilberthermometer entziehen dem Medium an der Kontaktstelle Wärme und messen immer nur ihre Eigentemperatur. Das heißt aber, daß der Messfühler mehr oder weniger (je nach seiner Masse) auch die Temperatur des zu messenden Mediums beeinflusst. Hinzu kommt, daß das Aufwärmen des Messfühlers eine bestimmte Zeit benötigt. Vorteile bieten da die in neuerer Zeit verwendeten **Infrarot-Thermometer**, die mit optischen Messmethoden berührungslos die Infrarotstrahlung des Messobjektes erfassen und in einen zugehörigen Oberflächen-Temperaturwert umsetzen. Bei dieser Messmethode ist praktisch keine Aufwärmzeit notwendig. Sie eignet sich so besonders zur schnellen Erfassung von Oberflächentemperaturen (z.B. der **Körperschalen Temperatur**), ohne dabei dem Messobjekt Wärme zu entziehen.

Wir werden im Praktikum diese Messmethode zur Bestimmung der Hauttemperaturen einsetzen.

Die **Körperkern Temperatur** wurde und wird mittels **Kontaktthermometer** in Körperhöhlen (Achselhöhle, After, Mundhöhle) gemessen. Für diese Messung wird Zeit benötigt und der Messort kann situationsbedingt von Körperkern unterschiedlich weit entfernt liegen (s. Abb. 2 auf S. 2). Bei der Messung mit Kontaktthermometern findet man den höchsten Wert in der Regel im Rektum, wobei die Lage der Messsonde eine Rolle spielt. Repräsentativ für die rektal gemessene Kerntemperatur ist der Messort in 4 cm Tiefe. Sublingual (in der Mundhöhle) liegt die Temperatur zumeist 0,5 bis 0,2°C unter der Rektaltemperatur. Falsche Werte werden gemessen, wenn infolge verstopfter Nasengänge vermehrt durch den Mund geatmet wird. Die Messung in der Achselhöhle erfordert lange Messzeiten von bis zu 30 Minuten, wobei der Oberarm fest an den Körper angelegt sein soll. Bei sportmedizinischen Untersuchungen wird gelegentlich mittels flexibler Sonden die Ösophagustemperatur oberhalb der Cardia gemessen. Diese Messung erfasst Änderungen der Bluttemperatur schneller, als die Rektaltemperaturmessung. Auch die **Infrarot-Temperaturmessung** ist zur Bestimmung der Kerntemperatur einsetzbar und bietet gegenüber den konventionellen Methoden auch Vorteile.

Speziell geformte optische Messköpfe können den äußeren Gehörgang scannen. Besonders am Trommelfell liegen die Blutgefäße direkt unter der Oberfläche, so daß die Temperatur des dort fließenden Blutes (mit kleinen Einschränkungen) gemessen werden kann. In diesem Bereich entspricht seine Temperatur der Körperkerntemperatur. Im Praktikum wird ein Thermoscanner verwendet. Es wird sich zeigen, daß die Tympanaltemperaturen (Ohrtemperatur) seitenverschieden sein kann. Bei beidseitigen Messungen wird als Kerntemperaturwert der höhere Wert genommen.

4.3 Wärmetransport (Wärmeabgabe)

Allgemein stehen 4 physikalische Mechanismen für den Wärmetranport zur Verfügung:

- **Konduktion** Wärmetransport in einem ruhenden Körper
- **Konvektion** Wärmetransport mit Hilfe eines bewegten Mediums (Gase, Flüssigkeiten)

- **Radiation** Infrarot-Anteil der Wärmestrahlung (nicht an Materie gebunden)
- **Evaporation** Wärmeverlust durch Verdunstung von Wasser und Schweiß auf der Haut.

Es ist zu unterscheiden zwischen

- dem **inneren Wärmestrom**, der den Transport von Wärme im Körper vom Entstehungsort hin zur Körperoberfläche beschreibt, und
- dem **äußeren Wärmestrom**, der den Wärmeaustausch von der Hautoberfläche an die Umgebung beschreibt.

4.3.1 Innerer Wärmestrom

Hier kommen für den Wärmetransport die Mechanismen von Konduktion und Konvektion zum Tragen.

Konduktion (Wärmeleitung)

ist allgemein die Übertragung von Wärme innerhalb eines Stoffes durch die Brown'sche Molekularbewegung. Dabei kommt es zum Ausgleich eines vorhandenen Temperaturgefälles. Die Grösse des Wärmestroms wird von den physikalischen Eigenschaften des Stoffes mitbestimmt. Bei biologischen Geweben beeinflusst der Wassergehalt entscheidend die Wärmeleiteigenschaften.

Zur Charakterisierung der Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes wird die **Wärmeleitzahl** λ formuliert.

Sie gibt in $W/(m \cdot ^\circ C)$ an, welche Wärmemenge (in Joule oder Js) im Beharrungszustand (Fließgleichgewicht) pro Sekunde durch $1m^2$ einer 1m dicken Schicht hindurchgeht, wenn der Temperaturunterschied zwischen den normal zum Wärmedurchgang liegenden Grenzflächen $1^\circ C$ beträgt. Beispiele:

<u>Gewebeart / Stoff</u>	<u>Wärmeleitzahl λ</u>
stark durchblutetes Fettgewebe	0,4 [W / (m °C)]
Epidermis	0,3 [W / (m °C)]
wenig durchblutetes Fettgewebe	0,2 [W / (m °C)]
im Vergleich dazu :	
Aluminium	200 [W / (m °C)]
Stahl	60 [W / (m °C)]
Stahlbeton	2,3 [W / (m °C)]
Hartholz	0,2 [W / (m °C)]
Mineralwolle / Styropor	0,04 [W / (m °C)]

Konvektion (Wärmeströmung)

(auch Wärmemittelführung,) ist allgemein die Wärmeübertragung, die durch Umwälzung von Flüssigkeits- oder Gasteilchen entsteht. Im biologischen Bereich ist es der Wärmetransport durch das fließende Blut. Insbesondere der große Variationsbereich der Durchblutung der Haut bestimmt die Grösse des nach Aussen gerichteten inneren Wärmestroms. Beachtenswert ist das in den Extremitäten realisierte Gegenstromprinzip. Dabei wird Wärme des in den Arterien fließenden Blutes an das Blut in den parallel laufenden Venen abgegeben, ohne die Hautoberfläche zu erreichen. Das Blut in der A. radialis kann so bis zu $8^\circ C$ kälter sein, als in der A. brachialis.

Die konduktiven und konvektiven Anteile des inneren Wärmestroms (H_i) werden zusammengefaßt in der Gleichung:

$$H_i = U \cdot A \cdot (T_{\text{Kern}} - T_{\text{Schale}})$$

Mit U = Wärmedurchgangszahl, A = Körperoberfläche, T_{Kern} = Kerntemperatur, T_{Schale} = mittlere Hauttemperatur

Die Wärmedurchgangszahl, der **U-Wert**, (früher K-Wert) wird zur Beurteilung der Wärmedämmeigenschaften eines Körpers verwendet. Im Gegensatz zur Wärmeleitzahl werden die Wärmeübertragungseigenschaften der Körperoberfläche gegenüber der Umgebungsluft mit berücksichtigt. Der U-Wert hat die Dimension $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$. Gerade in der Bautechnik spielt dieser Wert heute eine wichtige Rolle (z.B. Wärmedämmklasse K040 bei Mineralwolle).

Die Wärmedurchgangszahl für die Strecke Körperkern – Hautoberfläche liegt in dem Bereich zwischen ca. $7 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ (keine Hautdurchblutung) und ca. $50 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$. Allein die Vasokonstriktion der Gefäße der Extremitäten kann bereits den U-Wert um bis zu 50% variieren.

4.3.2 Äußerer Wärmestrom

Der äußere Wärmestrom beschreibt die Wärmeabgabe von der Körperschale (Haut) an die Umgebung. Neben Konduktion und Konvektion werden hier auch die Effekte der Wärmestrahlung und die Evaporation mit genutzt. Konduktion, Konvektion und Radiation (Wärmestrahlung) werden oft unter dem Begriff **Trockene Wärmeabgabe** zusammengefasst. In einem späteren Abschnitt soll etwas ausführlicher auf die Evaporation (Wärmeabgabe durch Verdunstung) eingegangen werden. Kommen wir aber zunächst zu den Teilkomponenten der trockenen Wärmeabgabe.

Konduktion (Wärmeleitung)

Am Übergang von Hautoberfläche zur Luft entsteht unter normalen Bedingungen eine ruhende Luftschicht, die als Grenzschicht gute Isolationseigenschaften aufweist. Die Wärmeleitung ist entsprechend erheblich geringer, als bei einem direkten Kontakt zwischen Hautoberfläche und festen oder flüssigen Stoffen der Umgebung (im Wasser oder Anlehnen an eine Wand).

Ein Schwimmer hat im Wasser eine ca. 200 mal höhere Wärmeabgabe als bei Aufenthalt in der Luft. Zum einen ist die Wärmeleitfähigkeit des Wassers ca. 20 mal größer als die der Luft. Hinzu kommt, dass sich die Grenzschicht zwischen Hautoberfläche und Wasser auf ca. 10% gegenüber Luft verringert.

Konvektion (Wärmeströmung)

Der Temperaturgradient zwischen Hautoberfläche und umgebender Luft bewirkt eine geringe Luftströmung (beim Stehen entlang der Körperachse). Die erwärmte Luft steigt auf und kühlere Luft strömt nach. Dieser Effekt kann durch eine aufgeprägte Luftströmung (Wind) stark gesteigert werden. Die damit verbundene Wärmeabgabe ist proportional der Wurzel der Strömungsgeschwindigkeit ($H \sim \text{SQRT } V_{\text{Wind}}$). Mit der Atemluft wird in Ruhe über Konduktion und Konvektion ca. 2% der Körperwärmeproduktion an die Umwelt abgegeben. Ein gesteigerter Gasaustausch (z.B. bei Höhenaufenthalt bzw. bei Arbeit) erhöht so auch die Wärmeabgabe.

Die Thermorezeptoren der Haut vermitteln dem ZNS indirekt über die Hauttemperatur eine Information über das Temperaturfeld der Umwelt. Bei starkem Wind wird durch die verstärkte Konvektion (und die damit verbundene höhere Wärmeabgabe) die Hauttemperatur erniedrigt. So wird die Temperatur der strömenden Luft als „kälter“ empfunden. Die Meteorologie berücksichtigt diesen Effekt im sog. **Windchill-Faktor** (Erfühlte Temperatur der Umgebung bei Wind). Verschiedene Berechnungsformeln sind im Umlauf. Eine vereinfachte Windchill-Formel lautet:

$$T_{\text{wc}} = 33 + (0,478 + 0,237\text{SQRT}(V) - 0,0124V) * (T - 33)$$

Mit : T_{wc} = gefühlte Temperatur in °C, T = Umgebungstemperatur in °C, V = Windgeschwindigkeit in km/h, SQRT = Quadratwurzel.

Beispiel: Bei -8°C und 4 Beaufort (mittlere Windgeschwindigkeit = 24km/h) errechnet sich eine Windchill-Temperatur von -22°C .

Radiation Wärmestrahlung

Wärmeenergie wird in Form von elektromagnetischen Wellen als Infrarotstrahlung transportiert. Sie ist nicht an Materie gebunden.

Langwellige Infrarotstrahlung (z.B. von Wänden, Gegenständen und Körpern in einem Raum oder von der Sonne) gelangt nahezu ohne Reflexion in den Körper. Kurzwellige Anteile dagegen werden bis zu 50% durch die Hautpigmentierung reflektiert.

Für die Wärmestrahlung gilt das Stefan-Boltzmann-Gesetz. Bei kleinen Temperaturgradienten gilt näherungsweise:

$$H_{\text{rad}} = k * A_{\text{eff}} * (T_{\text{Haut}} - T_{\text{Wand}})$$

Mit: H_{rad} = Strahlungsenergie, k = Systemkonstante, A_{eff} = effektive Körperoberfläche, T = Temperatur in °C. Die effektive Körperoberfläche A_{eff} beträgt je nach Körperhaltung 50 – 80 % der anatomischen Hautoberfläche.

Evaporation Verdunstung

Die Evaporation beschreibt den transepidermalen Wasserverlust des Körpers. Gemeint ist damit die Verdunstung von Körperwasser in Form von Schweiß (bzw. Wasserdampf) über die Haut- und Schleimhautoberflächen. Der damit verbundene thermodynamische Prozess des gerichteten Energietransports wird im Rahmen der Temperaturregulation vom Organismus genutzt, um überschüssige Wärme an die Umwelt abzugeben (für die Verdunstung von 1 l Wasser werden 2400 kJ Wärmeenergie benötigt).

Der Ort, wo diese Prozesse ablaufen ist die Grenzschicht zwischen Hautoberfläche und Umwelt. Die Wärmemenge, die durch Evaporation an die Umwelt abgegeben werden kann ist abhängig vom Verhältnis des Wasserdampfdrucks(P) der Hautoberfläche und der umgebenden Luft. Da der Wasserdampfdruck temperaturabhängig ist, kann selbst bei 100% Luftfeuchtigkeit Wärme an die Umwelt abgegeben werden, solange die Hauttemperatur größer als die Umgebungstemperatur ist, denn dann ist auch der Wasserdampfdruck der Haut größer als der Dampfdruck der Umgebungsluft. Für den Fall, dass die Umgebungstemperatur höher ist als die Körperschalentemperatur bleibt als Wärmeabgabemechanismus allein die Evaporation. Das gilt aber auch nur solange, wie die Umgebungsluft nicht Wasserdampf gesättigt ist (Tropen).

Die Verdunstungswärmeabgabe durch Evaporation wird beschrieben durch die Gleichung:

$$H_{\text{Evaporation}} = \alpha_e * A_{\text{eff}} * (P_{\text{H}_2\text{O}_{\text{Haut}}} - P_{\text{H}_2\text{O}_{\text{Umgebung}}})$$

Mit α_e = Wärmeübergangszahl für Evaporation, A_{eff} = effektive Körperoberfläche

Die **Wärmeübergangszahl α** beschreibt die Wärmeübergabe von der Oberfläche eines Körpers in die berührende Luft und umgekehrt. Sie hat die Dimension $W / m^2 \cdot ^\circ C$.

4.3.3 Anteile der Wärmeabgabemechanismen unter thermoneutralen Bedingungen

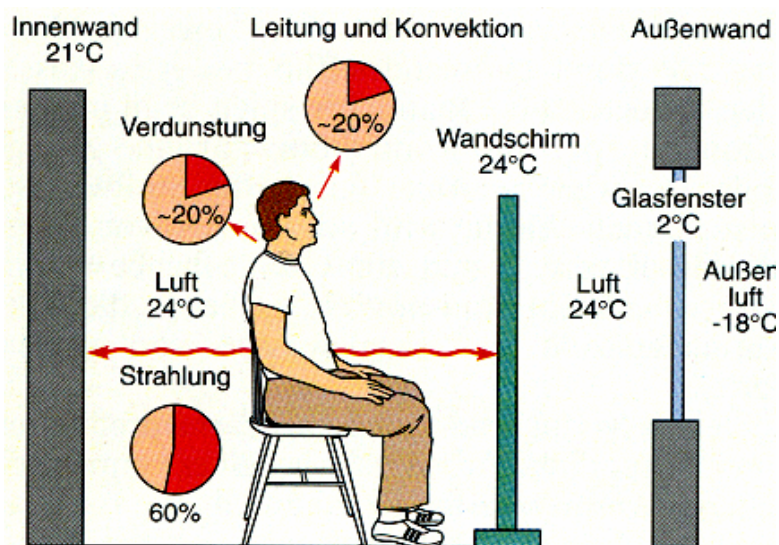


Abb. 3 %-Anteile der Wärmetransportmechanismen an der Wärmeabgabe der **Körperoberfläche** an die Umgebung unter den gezeigten Bedingungen. AUS:(Deetjen Speckmann, Physiologie 3.Auflage 1999)

Nicht berücksichtigt ist in Abb.3 die Wärmeabgabe über die Atemluft (Konduktion, Konvektion, Evaporation). Sie hat unter diesen Bedingungen einen Anteil von ca. 12% der Gesamtwärmeabgabe des Organismus an die Umwelt.

4.4 Transepidermaler Wasserverlust (TEWL)

Das vom Körper durch die Haut und die Schleimhäute des Atmungstrakts an die Umgebung abgegebene Wasser erfolgt zum einen passiv (also nicht willkürlich steuerbar) extraglandulär durch Diffusion (**Perspiratio insensibilis**). In Ruhe hat dabei die Hautoberfläche einen Anteil von ca. 65%, die wasserdampfgesättigte Ausatemluft ist mit ca. 35% an der Perspiratio insensibilis beteiligt. Zweitens führt die (aktive) Schweißsekretion über die Schweißdrüsen (glanduläre Evaporation) ebenfalls zu einem Verlust von Körperwasser. (**Perspiratio sensibilis**). Diese, durch vegetative Nervenimpulse gesteuerte Schweißdrüsenaktivität ist sehr guter Effektor der Temperaturregulation.

Die ekkrinen Schweißdrüsen sind unter komfortablen Umweltbedingungen inaktiv und werden erst durch thermische, körperliche oder emotionale Reize aktiviert.

Wie schon beschrieben, führt die Verdunstung von Wasser an der Hautoberfläche zum Wärmeentzug und so zur Abkühlung des Körpers. Dieser Mechanismus wird als **evaporative Wärmeabgabe** bezeichnet. Voraussetzung ist ein Wasserdampfdruck- Gefälle von der Haut zur Umgebung.

Die **Verdunstungswärme von Wasser** beträgt **ca. 2400kJ/l**. Durch das Verdunsten von ca. 0,5 l Wasser auf der Haut kann also beim Menschen etwa 1/6 der Ruhewärmeproduktion eines ganzen Tages abgegeben werden.

Unter normalen klimatischen Bedingungen (20°C Lufttemperatur, 40 – 60% Luftfeuchte) verliert der Mensch in Ruhe pro Tag ca. 2,5 l Wasser. Im einzelnen sind das Flüssigkeitsmengen von ca. 1,5 l in Form von Urin, 0,15 l sind im Kot enthalten, in der Atemluft 0,375 l. Durch insensible Abgabe über die Haut verliert man 0,375 l und als Schweiß 0,1 l. Ein Ausgleich des Flüssigkeitsverlustes erfolgt durch Getränke und andere Flüssigkeiten (ca. 1,25 l), ca. 1l findet sich in der Nahrung und ca. 0,25 l wird durch Bildung von Oxydationswasser bei der Nahrungsverbrennung im Körper selbst bereit gestellt.

Der Prozess des TEWL dient aber eben nicht nur der Thermoregulation, sondern ist auch ein nicht zu vernachlässigender Faktor bei der Bilanzierung des Körperwassers.

Wie schon auf Seite 5 angesprochen, wird die treibende Kraft des transepidermalen Wassertransports durch den Gradienten zwischen dem durch Diffusion des Körperwassers erzeugten Wasserdampfdruck auf der Haut und dem Wasserdampfdruck der Umgebung bestimmt.

Gemessen wird der Wert des TEWL in g / (m²·h) mit: g = Gramm, m² = Verdunstungsfläche, h = Stunde.

Normale Ruhewerte liegen zwischen 20 und 40 Gramm pro Quadratmeter Körperoberfläche und Stunde. Bei steigender Umgebungstemperatur steigt der Wert nicht linear (nahezu Verdopplung bei Temperaturänderung von 20°C auf 30°C). Eine Erhöhung der relativen Feuchte der Umgebungsluft läßt den TEWL sinken. Zwischen diesen beiden Parametern gibt es ebenfalls keinen linearen Zusammenhang. Steigende relative Feuchte geht mit einem steigenden Umgebungsdampfdruck einher, sodaß die treibende Kraft der passiven Diffusion, der Druckgradient zwischen Haut und Umgebung, sich verringert. Somit sinkt der TEWL.

Als Folge des Biorhythmus (Änderung des „Sollwertes“ der Körperkerntemperatur über Tag und in der Nacht) ist der TEWL am Vormittag meist höher, als am Nachmittag, auch werden jahreszeitliche Schwankungen beobachtet.

An den einzelnen Körperpartien werden unterschiedliche TEWL gemessen.

Abstufungen können wie folgt angegeben werden: Handflächen > Fußsohlen > Stirn , Handrücken > Unterarm, Oberarm, Brust, Abdomen, Rücken.

Auch das Lebensalter beeinflusst den TEWL-Wert. Neugeborene haben in den ersten 2 bis 4 Wochen eine höhere Wasserdurchlässigkeit der Haut. Bei älteren Menschen nimmt die TEWL ab.

Bei Bedeckung der Haut, z.B. mit Kleidung oder kosmetischen und pharmazeutischen Produkten, aber auch bei Hautschädigungen, können diese Transportprozesse erheblich behindert werden. Wirkstoffe, die in die Haut eindringen (Salben) erzeugen einen zusätzlichen Druckverlust.

Die Behinderung des TEWL führt zu einer Schwellung der Hornschicht. (Man kennt das Gefühl, wenn man einige Zeit lang Gummihandschuhe getragen hat). Das kann an einigen Körperstellen z.B. mit dem im Praktikum vorgestellten Hautschichtdickemessgerät gemessen werden.

4.4.1 Messprinzip des TEWL

Physikalische Grundlage des TEWL ist das Diffusionsgesetz von Fick. Dabei gibt der Diffusionsstrom an, wieviel Wasser pro Zeiteinheit durch eine bestimmte Fläche transportiert wird.

Der Diffusionsstrom dm/dt ist proportional der Fläche A [m²] und dem Dichtegradienten dc/dx (c = Wasserdampfdruck der Luft [Pa], x = Distanz [m]). Der Diffusionskoeffizient des Wasserdampfs in Luft ist D [$0,670 \cdot 10^{-3}$ g/hmPa].

$$\text{Das Fick'sche Gesetz lautet: } dm/dt = D \cdot A \cdot dc/dx.$$

Es ist nur für eine homogene Diffusionszone gültig. Deshalb werden an die Meßsonde genaue Anforderungen gestellt.

Das an der Hautoberfläche verdunstende Wasser tritt durch den Hohlzylinder der Sonde. Dort sind zwei Sensorpaare (bestehend je aus Temperatur- und Feuchtesensor) in definiertem Abstand übereinander angeordnet. Ein Mikroprozessor berechnet aus den Differenzen der Messwerte der Sensorpaare den Wasserdampfdruck und folglich den TEWL.

4.4.2 Bestimmung des mittleren Wasserverlusts über die Haut

Wie oben beschrieben ist der TEWL nicht nur von Umweltfaktoren und dem Aktivitätszustand des Individuums abhängig, auch antropometrische Daten wie z.B. Lebensalter und Körpermaße beeinflussen den individuellen transepidermalen Wasserverlust. Bestimmend ist die

Gesamtkörperoberfläche und die Anteile der verschiedenen Körperpartien, die unterschiedliche Evaporationsraten aufweisen.

Körperoberfläche

Für die rechnerische Bestimmung der Körperoberfläche aus Körpergröße und Körpergewicht ist die in der Literatur angegebene Gleichung brauchbar. Sie ist aber umso ungenauer, je weiter die Person von den Normalmaßen abweicht.

Es gilt : **Körperoberfläche $A = 0,00718 * (\text{KGW}^{0,425} * \text{Ht}^{0,725}) \text{ [m}^2\text{]}$** (Dubois)

Mit KGW = Gewicht [kg] und Ht = Körpergröße [cm].

Die Anteile an der Gesamtkörperoberfläche sind für die entsprechenden Körperteile unter 4.2.1 (auf Seite 3) angegeben.

Die an den Meßpunkten gemessenen Werte des TEWL und der Temperatur sind mit dem zugehörigen Flächenfaktor F zu multiplizieren, um die Ganzkörperwerte zu erhalten.

Die Haut der Körperoberfläche zeigt einen komplexen Aufbau und besitzt spezielle Eigenschaften. Nachfolgend soll eine kurze Einführung in die Haut gegeben werden.

4.5 Haut

Unsere Haut hat zahlreiche lebenswichtige Funktionen. Sie grenzt den Organismus gegen die Umwelt ab, steht aber gleichzeitig mit ihr im intensiven Kontakt. Ihre mechanische Struktur schützt vor Stößen und Reibung. Ihr natürlicher Säureschutzmantel hält Keime ab.

Sie übernimmt entscheidende Aufgaben bei der Temperaturregulation des Organismus (sie ist dabei sowohl Rezeptor, als auch Effektor) und sie vermittelt Wohlbefinden und Schmerz. Sie ist an biochemischen Prozessen beteiligt und ist Austauschfläche für Gase, chemische Lösungen, Arzneimittel und Giftstoffe. Sie erzeugt Enzyme und Hormone. Als variable Speichermatrix für Wasser und Elektrolyte fallen ihr wichtige Aufgaben zu bei kurzfristigen Prozessen wie Verschiebung und Austausch von Flüssigkeiten im Rahmen der Kreislaufregulation des Niederdrucksystems. Kurz zusammengefaßt: Die Haut dient dem Organismus als mechanischer und biochemischer Schutz, thermischer Austauscher, Wasserspeicher und sie ist Teil verschiedener Regulationssysteme.

4.5.1 Aufbau der Haut

Die menschliche Haut besteht aus drei Schichten. Jede dieser Schichten übernimmt bestimmte Aufgaben, arbeitet jedoch mit der angrenzenden Schicht eng zusammen und ist mit dieser fest verzahnt.

- Epidermis (Oberhaut)

Sie ist die äußere Schicht unseres Körpers und steht in direkten Kontakt mit der Außenwelt. Ihre Schichtdicke ist an verschiedenen Körperpartien unterschiedlich und wird bestimmt durch Geschlecht, Alter und genetische Faktoren, sowie mechanische Beanspruchung (Handflächen, Fußsohlen) oder andere äußere Einflüsse. Durch noppenartige Einbuchtungen ist die Oberhaut mit der darunterliegenden Lederhaut verzahnt.

Sie besteht wiederum aus der Keimschicht (Stratum germinativum), die für die stetige Hauterneuerung und die Bildung des Melanins (Hautbräunung) sorgt. Fortwährend hier neugebildete Zellen wandern nach außen in die Hornschicht (Stratum corneum). Bei gesunder Haut dauert diese Wanderung 4 Wochen. Die Zellen werden dabei in Kreatin umgewandelt, sie werden flach und plattenförmig und sterben ab. Schließlich lösen sie sich einzeln oder in kleinen Schuppen von der Oberfläche.

- Dermis (Lederhaut)

Die Lederhaut gibt der Haut Halt, Elastizität und Reißfestigkeit durch Kollagen- und Elastinfasern. In dieser Schicht liegen auch die Sinneszellen für Schmerz, Juckreiz, Temperatur etc.. Der hohe Gehalt von Chonditin und Hyaluronsäure sorgt für ein Flüssigkeitsdepot, über das die Epidermalzellen mit Nährstoffen versorgt werden.

- Subcutis (Unterhaut)

Diese unterste Hautschicht enthält neben Fettzellen auch Blutgefäße, Talg- und Schweißdrüsen und kleine Muskeln an den Haarfollikeln. Sie dient als Nährstoffspeicher und Polster gegen Stöße von außen. Bis auf die Bereiche der Nase, der Augenlider und der Ohrmuscheln überwiegt der Anteil der Fettzellen. Ihr Volumen, Anzahl und Anordnung ist konstitutionell und hormonell bestimmt.

4.5.2 Die Haut als Wasserspeicher, Hautschichtdicke

Die beiden oberen Schichten der Haut haben eine Speicherfunktion für Wasser und ermöglichen so unter anderem eine schnelle Wasserabgabe an die Umwelt im Rahmen der Thermoregulation.

Messungen zeigen mittlere Schichtdicken der Haut von ca. 4 mm (2-8 mm, je nach Lokalisation, Geschlecht und Alter).

Bei einer Person mit 70 kg Körpergewicht und einer mittleren Körperoberfläche von ca. 1,73 m² und einer mittleren Hautschichtdicke von 4 mm beträgt das Volumen der Haut ca. 7 Liter. Das entspricht dermatologischen Betrachtungen, wo der Gewebeanteil von Haut und Anhangsgebilde mit 10 bis 12% des Körpergewichts angegeben wird. Bei normaler Hydratation liegt der Wasseranteil bei diesen Geweben bei 64 - 68%.

Das Gewebsvolumen der Haut besteht nur zu einem Drittel aus Zellen, zwei Drittel sind extrazelluläre Matrix, die wiederum zu 50% (~2,4 l) aus **austauschbarem Wasser** besteht. Untersuchungen zeigen, daß es kurzfristig zu deutlichen Schichtdickeänderungen der Haut kommen kann. Nimmt man eine Änderung von nur 0,5 mm an, die selbst vom aufmerksamen Auge kaum erkannt werden kann, bedeutet das eine Umverteilung von 850 ml Wasser. Man neigt dazu, das extrazelluläre Flüssigkeitskompartiment, zu dem auch das Flüssigkeitsvolumen der Haut zählt, als ein homogenes Gebilde zu betrachten. Wie sich gezeigt hat, sind aber die extrazellulären Körpergewebe unterschiedlich an den Änderungen des extrazellulären Flüssigkeitsvolumens beteiligt. Durch Verschiebung infolge hydrostatischer Belastungen (langes Stehen) oder lokalen krankhaften Veränderungen tiefer gelegener Gewebe und Organe (Ödembildung bei Nierenerkrankungen, Schlafapnoe, Höhenkrankheit) wird die Kapazität des Lymphsystems überschritten. Die Haut kann hier kurzfristig als Zwischenspeicher für Flüssigkeiten dienen.

An einigen Stellen der Körperoberfläche, überall da, wo die Haut Knochen überspannt (und wenig Unterhautfettgewebe vorhanden ist), kann die Bestimmung der Hautschichtdicke (bzw. die Wassereinlagerung in der Haut) mit einer Abstandsmessung mittels Ultraschall vorgenommen werden. Mögliche Messorte sind z.B. Stirn, Jochbein, Sternum und Tibia.

In der Literatur werden als repräsentative Messorte für den Oberkörper die Stirn, für den unteren Körperbereich die Tibia angegeben. Für den Laborgebrauch stehen computergestützte Ultraschallmessplätze (gedacht speziell zur Beurteilung der Kollagenstrukturen) zur Verfügung, die im A- und B-Mode die einzelnen Hautschichten abbilden. Damit ist eine sehr differenzierte Messung der Hautstruktur und der Hautschichtdicken möglich.

5. Temperaturregulation

5.1 Temperaturverhalten (Regulationstypen)

- Poikilothermie

Bei einigen Vertebraten wie z.B. Reptilien, Amphibien, Fischen usw., liegt die Körpertemperatur nur geringfügig über der Umgebungstemperatur. D.h. die Aktivität und damit der Energieumsatz dieser Tiere ist eng mit dem Klima ihres Lebensraums gekoppelt und so auch an das Nahrungsangebot angepasst. Eine darüber hinausgehende Beeinflussung der Körperkerntemperatur bzw. des Energieumsatzes ist verhaltensgesteuert (z.B. Reptilien können durch Sonnenbaden Körperkerntemperaturen bis 45°C erreichen, Fische suchen wärmere Gewässer auf). Dieses Verhalten der Körpertemperatur, ohne autonome Regulation wird als Poikilothermie bezeichnet.

- Homöothermie

Säugetiere und Vögel haben einen hohen Ruheenergieumsatz mit hoher Wärmebildungsrate. Dadurch liegt ihre Körpertemperatur deutlich über der durchschnittlichen Temperatur ihrer Umgebung. Sie besitzen weiterhin die Fähigkeit, dieses relativ hohe Temperaturniveau innerhalb gewisser Grenzen konstant zu halten (Säugetiere 36 bis 38°C, Vögel 41 bis 42°C). Hier spricht man von Homöothermie. Eine Konstanz der Körperkerntemperatur mit entsprechend gleichmäßigen Aktivitätszustand des Stoffwechsels hat sich als vorteilhaft erwiesen, da damit einerseits das Individuum weitgehend unabhängig vom Klima wird und so seinen möglichen Lebensraum vergrößert. Andererseits arbeitet der Energiestoffwechsel stets in einem optimalen Temperaturbereich, so daß jederzeit maximale Arbeit geleistet werden kann. Dazu bedarf es eines Regulationssystems, das die thermische Belastung des Organismus durch innere und äußere Faktoren in einem bestimmten Bereich kompensieren kann. Thermisches Gleichgewicht liegt vor, wenn Wärmeabgabe und Wärmeproduktion sich entsprechen.

- Heterothermie

Eine weitere Form der Temperaturregulation findet sich z.B. bei kleinen Nagetieren, kleinen Vögeln und Insektenfressern. Bei ihnen wird die Körperkerntemperatur konstant gehalten, allerdings sind je nach Aktivitätszustand mehrere Temperaturniveaus möglich. (Z.B. während der aktiven Phase ca. 37°C, bei Torpor (Kältestarre) ca. 10 bis 20°C (Kolibri 8-10°C) und im Winterschlaf ca. 5°C (Igel 3-4°C)). Dieses Temperaturregulationsverhalten wird als Heterothermie bezeichnet. (Bei den Ureinwohnern Australiens, den Aborigines wurde beobachtet, dass die Körperkerntemperatur im Schlaf auf ein erniedrigtes Temperaturniveau eingestellt wird).

Ziel dieses Regulationsverhaltens ist eine Senkung des Gesamtenergieumsatzes, der zum einen notwendig ist, um die Körperfunktionen aufrecht zu erhalten, zum anderen aber die Wärmeverluste gegenüber der Umwelt minimiert.

5.2 Zur Theorie des Regelkreises

Regelungsprozesse folgen den unserer Welt eingepprägten Naturgesetzen. Aufgabe der Regelung besteht z.B. darin, eine bestimmte physikalische Größe innerhalb eines Systems konstant zu halten, oder nach einem bestimmten Programm zu ändern, unabhängig von irgendwelchen von aussen einwirkenden Störgrößen. Die Aufrechterhaltung des Gleichgewichtszustands ist mit Ausgleich- bzw. Regelungsprozessen verbunden, die in ihrem Wirkungskreislauf rückgekoppelt sind, d.h. der Wirkungsablauf einer Regelung ist in sich geschlossen. So bezeichnet man einen Prozess im Sinne einer Regelung einen Regelkreis. Ein geregeltes System ist dann in weiten Funktionsbereichen stabil, wenn sein Rückkopplungspfad in seiner Gesamtheit ein negatives Vorzeichen hat (Gegenkopplung). Rückgekoppelte Regulationsprozesse haben ihren Platz in der unbelebten Natur ebenso wie in der belebten Natur. Sie wirken in einzelnen Organismen und ihren Organisationsgemeinschaften. Sie finden sich aber auch in sozialen Strukturen wie der Gesellschaft, der Wirtschaft etc.

Das Regelwerk regelungstheoretischer Betrachtungen wurde im technischen Bereich entwickelt. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden biologische Regulationsmechanismen erstmals mit Begriffen formuliert, abgeleitet aus der technischen Regelungstechnik.

Die Übertragung regelungstechnischer Begriffe auf biologische Systeme birgt allerdings eine Gefahr, da die regelungstechnischen Begriffe den überschaubaren und zeitlich relativ konstanten technischen Systemen angepaßt sind. Das biologische Geschehen kann mit den regelungstechnischen Prinzipien nur in seinen einfachen Grundzügen schematisch erfaßt werden, wobei erhebliche Einschränkungen im Funktionsbereich und die Vernachlässigung wichtiger Teilfunktionen der Regulation in Kauf genommen werden müssen. Denn biologische Regulationsmechanismen (wie z.B. die Regulation der Körperkerntemperatur in Abb.4a) haben stets die Struktur von vermaschten Regelkreisen, in denen beispielsweise die Stellgröße des einen Regelkreises eine Führungsgröße oder einfach nur eine

Störgröße für einen anderen Regelkreis sein kann. Auch können Teilstücke einer Struktur gemeinsame Elemente verschiedener Regelkreise sein.

Der Nutzen der regulatorischen Betrachtung liegt nicht in der Anwendung der technischen Nomenklatur, sondern in der Möglichkeit, sich die Grundstruktur der rückgekoppelten homöostatischen Regulation klar zu machen und die in der Technik zur Analyse solcher Systeme entwickelten mathematischen Verfahren auf biologische Systeme anzuwenden.

5.2.1 Technischer Regelkreis

Der Regelkreis lässt sich allgemein in zwei charakteristische Baugruppen unterteilen: die der Regelstrecke und der Regeleinrichtung.

Sie sind über die Regelgröße und die Stellgröße miteinander verknüpft.

Die Regelstrecke ist der Teil des Regelkreises, die über Meßfühler eine Regelgröße x erzeugt, deren Beeinflussung Aufgabe der Regelung ist. Äußere Einwirkungen auf die Regelstrecke (Störungen z) zeigen auch eine Wirkung auf die Regelgröße x . Sie ist die Ausgangsgröße der Regelstrecke und gleichzeitig Eingangsgröße des Reglers. Der Regler ist der Teil der Regeleinrichtung, der aus der Abweichung von Regelgröße x und Führungsgröße w durch Differenzbildung und Verstärkung eine Stellgröße y erzeugt. Die wiederum beeinflusst über ein Stellglied den Massen- oder Energiestrom der Regelstrecke dahingehend, daß die Differenz von Führungsgröße und Regelgröße zu einem Minimum wird. Die Führungsgröße selbst kann dabei ein fester Wert sein (fester Sollwert) oder einen vorgeschriebenen, fremdgesteuerten Verlauf haben (z.B. zeitabhängiger Sollwert). Darüber hinaus kann die Führungsgröße auch die Funktion einer oder mehrerer anderer physikalischer Größen sein. Letzteres ist für biologische Regelkreise typisch, wobei hier auch noch Adaptations- und Lernprozesse über die Zeit die Führungsgröße beeinflussen.

Die Regeleinrichtung umfaßt die Bauglieder der Meßfühler, des Reglers (auch Meßwerk bezeichnet) und des Stellglieds. Das über den Meßfühler transformierte Signal der Regelgröße wird im Meßwerk mit dem Signal der Führungsgröße verrechnet und verstärkt. Der Signalfußplan eines Regelkreises ist nachfolgend gezeigt.

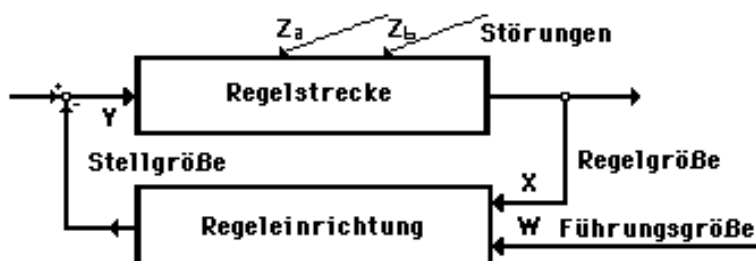


Abb. 4a Blockschaltbild eines technischen Regelkreises

5.2.2 Biologischer Regelkreis

Das Blockschema eines technischen Regelkreises kann als Grundstruktur mit seiner Nomenklatur bedingt auch auf biologische Regulationen übertragen werden.

Im Block der Regeleinrichtung werden lediglich die technischen Bezeichnungen **Fühler**, Meßwerk (Regler, Vergleichler) durch den physiologischen Begriff **Rezeptor**, **Stellglied** durch den Begriff **Effektor** und **Regler** durch **Regulationszentrum** (regulatorisch wirksame Netzwerke) ersetzt. In dem Block der für die **Regelstrecke** steht, wird im biologisch- medizinischen Bereich üblicherweise **der Parameternamen der regulierten Größe** eingetragen.

Der Nutzen liegt darin, daß bei der Anwendung der gleichen Nomenklatur die in der Technik in diesem Bereich entwickelten mathematischen Analyseverfahren und Modellbetrachtungen, mit Einschränkung, auch auf biologische Systeme angewendet werden können.

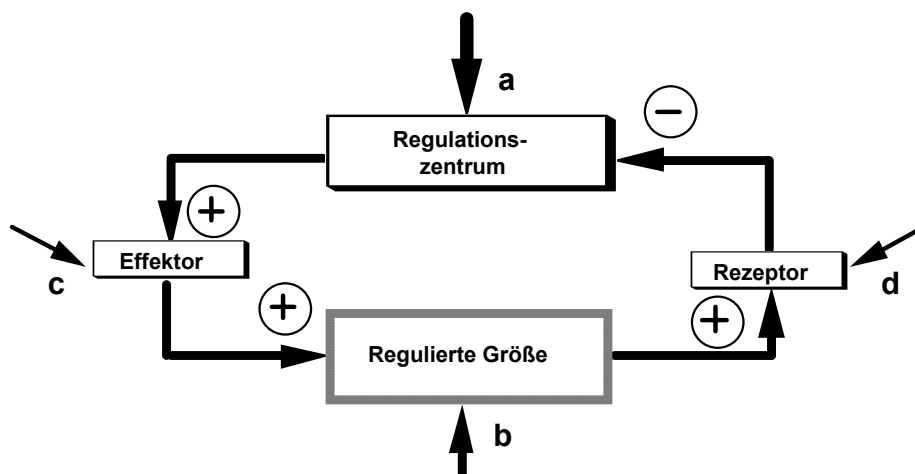


Abb. 4b Schema eines biologischen Regelkreises. (Pfeile = Wirkungsrichtung). Bedeutung der Vorzeichen: (+) : das nachfolgende Glied im Regulationskreis ändert sich gleichsinnig mit dem vorhergehenden (positive Rückkopplung), (-) : das nachfolgende Glied im Regulationskreis ändert sich gegensinnig zu dem vorhergehenden (negative Rückkopplung).

5.3 Regelkreis der Temperaturregulation

Bei der Regulation der Körpertemperatur handelt es sich um ein Regulationssystem, das durch das Schema eines Regelkreises ausreichend beschrieben werden kann. Es wird daher oft als *das* Beispiel einer biologischen "Regelung" angeführt. Das Funktionsziel der Temperaturregulation ist eine relative Konstanz der Körperkerntemperatur. Aktivitätsbedingte Schwankungen der Wärmeproduktion oder Veränderungen der thermischen Umweltbedingungen haben Auswirkungen auch auf die Temperatur des Körperkerns, wenn nicht durch die Regulationsmechanismen eine ausgeglichene Wärmebilanz, also:

$$\text{Wärmeproduktion} = \text{Wärmeabgabe}$$

erreicht wird.

Das System der Temperaturregulation gleicht einem vermaschten Regelkreis mit mehreren Sätzen von Temperaturfühlern, mehreren untereinander verbundenen zentralen Reglern und mehreren Effektoren zur Erhöhung oder Verminderung der Wärmeproduktion bzw. Wärmeabgabe.

5.3.1 Elemente des Temperaturregelkreises

Es lassen sich aus dem Funktionsschema in Abb.5 mehrere Regelkreise skizzieren, die jeweils der Grundstruktur biologischer Regelkreise entsprechen. Wie unter 5.2.2 beschrieben und in Abb. 4b skizziert wird ein Regelkreis durch vier Elemente beschrieben: Regulationszentrum (Regler), regulierte Größe, Effektor, Rezeptor.

- Vegetative Effektoren:

- Hautgefäße mit sympathischer, vasokonstriktorischer Innervation
- Eingeweidegefäße mit sympathischer, vasokonstriktorischer Innervation
- Schweißdrüsen mit cholinerg, sympathischer Innervation
- Sympathische Innervation der Leber, der Muskulatur, des Fettgewebes und des Nebennierenmarks (Steigerung des Stoffwechsels).
- Schilddrüse (Steuerung über hypothalamischen Thyreotropin Releasing Factor (TRF) und thyreotropes Hormon)

- Somato-motorische Effektoren:

- Skelettmuskulatur einschließlich der Atemmuskulatur und thermoregulatorischer Verhaltensweisen: Kleidung, Heizung, Kühlung, Körperhaltung, Kältezittern, Wärmehyperpnoe und Hechelatmung

- Fühler der Temperaturregulation:

- Thermorezeptoren der Haut: Kaltrezeptoren (lösen Kälteabwehrmechanismen aus, höchste Dichte im Gesicht, max. Empfindlichkeit um 30°C)
Warmrezeptoren (lösen bei äußerer Wärme Wärmeabwehrmechanismen aus, max. Empfindlichkeit bei 43°C).
- Innere Temperaturrezeption: hypothalamische Thermosensibilität, spinale Thermosensibilität, weitere thermosensible Strukturen im Körperinneren (Bauchhöhle, Thorax)

- Regler der Temperaturregulation:

- auf mehreren Ebenen des Zentralnervensystems angelegt, hauptsächlich integrierende Strukturen im Hypothalamus mit zusätzlichen Substraten im Mesencephalon und Rückenmark.

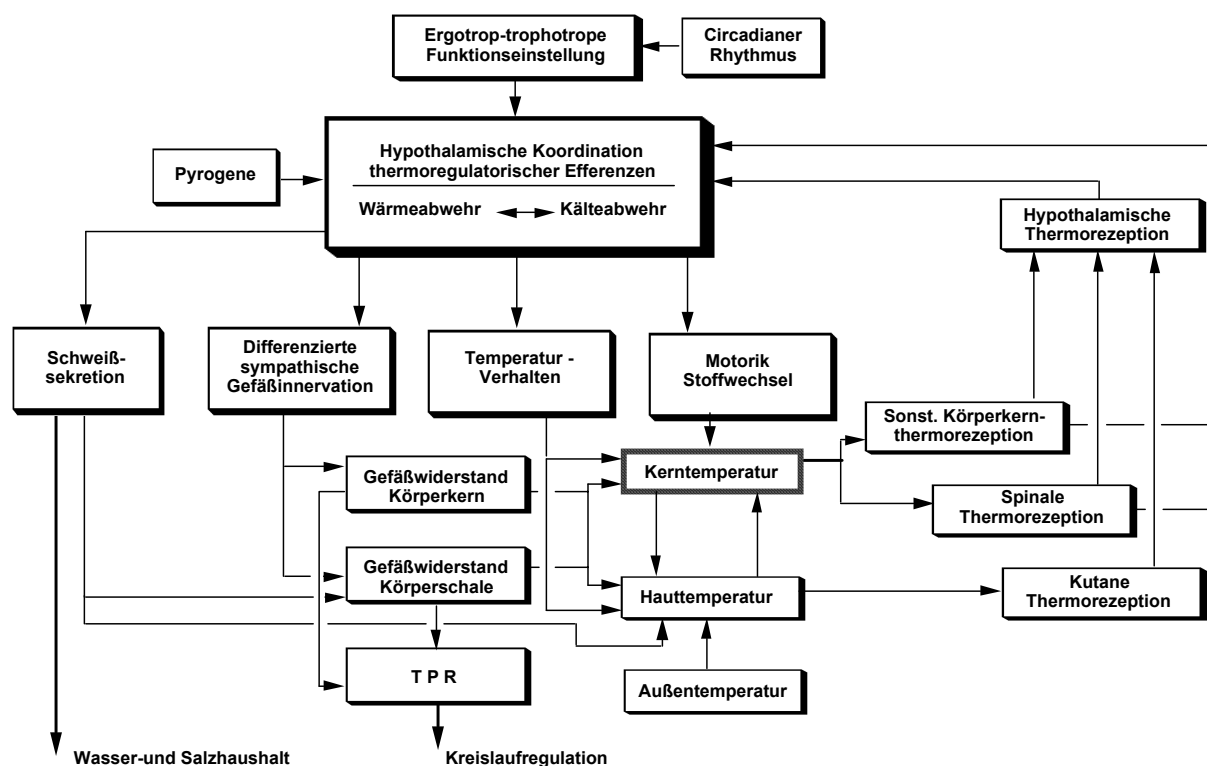


Abb. 5 Funktionsschema der Temperaturregulation des homiothermen Organismus

5.4 Funktionsweise des Temperaturregulationssystems

Je nach Umgebungstemperatur werden vom Körper unterschiedliche Kombinationen der verfügbaren Regulationsmechanismen eingesetzt:

5.4.1 Temperaturregulation innerhalb der thermischen Neutralzone (TNZ)

Hier wird die Balance von Wärmeproduktion und Wärmeabgabe allein durch Vasokonstriktion bzw. Vasodilatation der Blutgefäße hergestellt. Die Variabilität allein der Hautdurchblutung liegt bei ca. 1 : 7, bezogen auf den ganzen Körper. Damit kann eine Senkung des nach aussen gerichteten inneren Wärmestroms von ca. 80% erreicht werden.

Als TNZ wird der Temperaturbereich definiert, in dem sich der Mensch behaglich fühlt, (also die Umgebungstemperaturen die zu keiner bewußten Temperaturempfindung führen). Normalerweise liegt die TNZ (Aufenthalt in einem Raum, im unbedeckten Zustand, bei Windstille und 50% Luftfeuchte) zwischen 27 und 31°C .

Mit normaler Bekleidung sinkt der Temperaturbereich auf 18 bis 22°C. Die Temperatur in der TNZ, bei der der Ruheenergieumsatz am geringsten ist, wird als **Indifferenztemperatur** bezeichnet.

5.4.2 Temperaturregulation oberhalb der thermischen Neutralzone:

Bei Abweichungen der Temperatur **nach oben** erfolgt eine abgestufte Aktivierung von Wärmeabwehrmechanismen:

- 1.) **Reduktion der Wärmebildung**
unter Verminderung der sympatho-adrenalen Innervation und Herabsetzung des Stoffwechsels durch motorische Inaktivierung,
- 2.) **Erhöhung der Wärmeabgabe**
durch Dilatation der Hautgefäße bei Konstriktion in inneren Organen, durch Wasserverdunstung mit Hilfe der Schweißsekretion (Evaporation) (bzw. durch Hechelatmung, vor allem bei behaarten Tierspezies), durch entsprechende Verhaltensweisen (z.B. Körperhaltung, Wechsel der Bekleidung).

5.4.3 Temperaturregulation unterhalb der thermischen Neutralzone:

Bei Abweichungen der Temperatur **nach unten**:

- 1.) **Erhöhung der Wärmebildung**
durch Erhöhung des Stoffwechsels mit Hilfe erhöhter sympatho-adrenaler Innervation und vermehrter Ausschüttung von Schilddrüsenhormonen, mit Hilfe erhöhter motorischer Aktivität (Muskeltonus, Bewegung, Kältezittern)
- 2.) **Reduktion der Wärmeabgabe**
durch Konstriktion der Hautgefäße und Dilatation in inneren Organen (differenziertes Innervationsmuster) durch thermoregulatorische Verhaltensweisen.

Charakteristisch ist also ein integrierter Einsatz vegetativer und somato-motorischer Innervationen zur Erreichung des jeweiligen Funktionszieles der Temperaturregulation des Körperkerns. Die Einstellung der Gesamtheit der Mechanismen der Wärme- oder Kälteabwehr erfolgt dabei auf Grund der zentralen Verrechnung aller Informationen aus peripherer und zentraler Thermosensibilität.

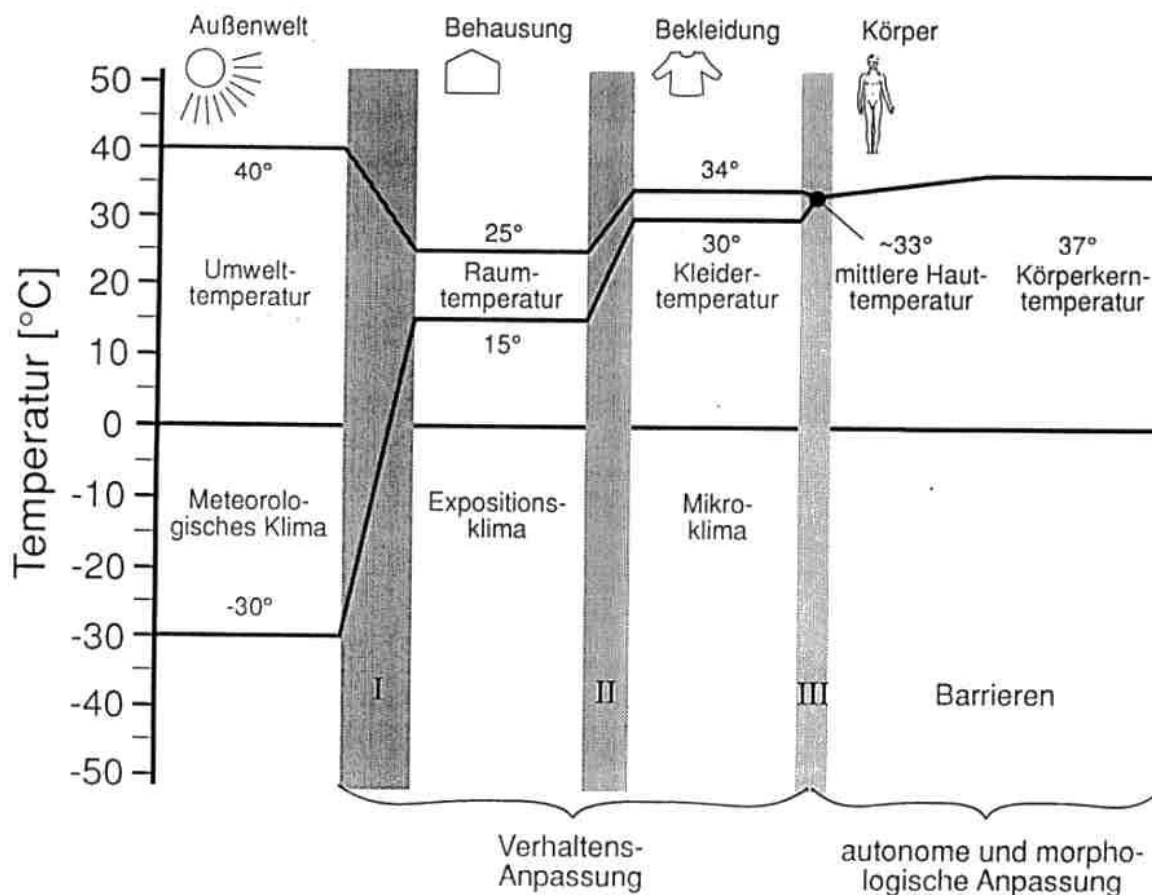


Abb.6 Autonome- und Verhaltens- Anpassung zur Wärmeabgabe und Kälteabwehr

5.5 Wechselbeziehungen zwischen Temperaturregulation, Kreislauf- und Atemregulation

Das Regulationssystem für die Körpertemperatur ist mit anderen Regulationssystemen funktionell verknüpft (s. Abb.5). Am Beispiel der Verknüpfung der Temperaturregulation mit der Atmungs- und der Kreislaufregulation lässt sich das Prinzip der "Vermaschung" biologischer Regelkreise besonders gut erkennen.

Das Kreislaufregulationssystem ist einer der wichtigsten Effektoren der Temperaturregulation, da regulatorische Veränderungen der Wärmeabgabe durch Änderungen der Durchblutungsverteilung zwischen Körperkern und Körperschale, insbesondere der Hautdurchblutung, bewerkstelligt werden. Durch eine differenzierte Aktivierung bzw. Inaktivierung verschiedener Sympathikusäste, bei der Konstriktion in der Haut mit Dilatation in inneren Organen verbunden ist und umgekehrt, erreicht der Organismus starke Variationen der Hautdurchblutung und damit des Wärmetransports vom Körperinneren zur Körperoberfläche ohne wesentliche Änderungen des gesamten peripheren Strömungswiderstandes (TPR). So kann ohne stärkere Veränderungen des Herzzeitvolumens der Blutdruck relativ konstant gehalten werden. Erst wenn dieser Mechanismus gestört ist - etwa durch zusätzliche Vasodilatation in inneren Organen - wird die Blutdruckregulation beansprucht (Kollapsneigung in der Sauna nach großen Mahlzeiten). Die Erhöhung der Wärmeproduktion bei Kälteabwehr erfordert eine Mehrdurchblutung der aktiven Gewebe, in erster Linie der Muskulatur, die wie bei einer Arbeitsanpassung durch Metabolite beeinflusst wird.

Vor allem bei Tieren mit beschränkter Schweißsekretion wird die Atmung zum Zwecke vermehrter Wärmeabgabe durch Wasserverdunstung eingesetzt (Hechelatmung). Dieser Mechanismus ist beim Menschen nur rudimentär entwickelt. Die Ventilation als einer der Effektoren der Wärmeabgabe ist ihrerseits auch Effektor im Atmungsregulationssystem, das auf Konstanthaltung der Blutgaskonzentrationen ausgerichtet ist. Die Wirkung der wärmebedingten Hyperventilation würde die Blutgaskonzentrationen ändern (als Störgröße im Atmungsregulationssystem), wenn dieser Effekt nicht durch Umschaltung der Atemform kompensiert würde: die Wärmehyperpnoe erfolgt mit erhöhter

Atemfrequenz und erniedrigtem Atemzugsvolumen, was einen entsprechenden Anstieg des alveolären Anteils der Ventilation verhindert.

5.6 Untersuchungen zur Temperaturregulation

Die Messungen am Menschen in diesem Praktikum werden sowohl unter thermoneutralen Ruhebedingungen als auch v o r , w ä h r e n d und n a c h einer körperlichen Belastung durchgeführt.

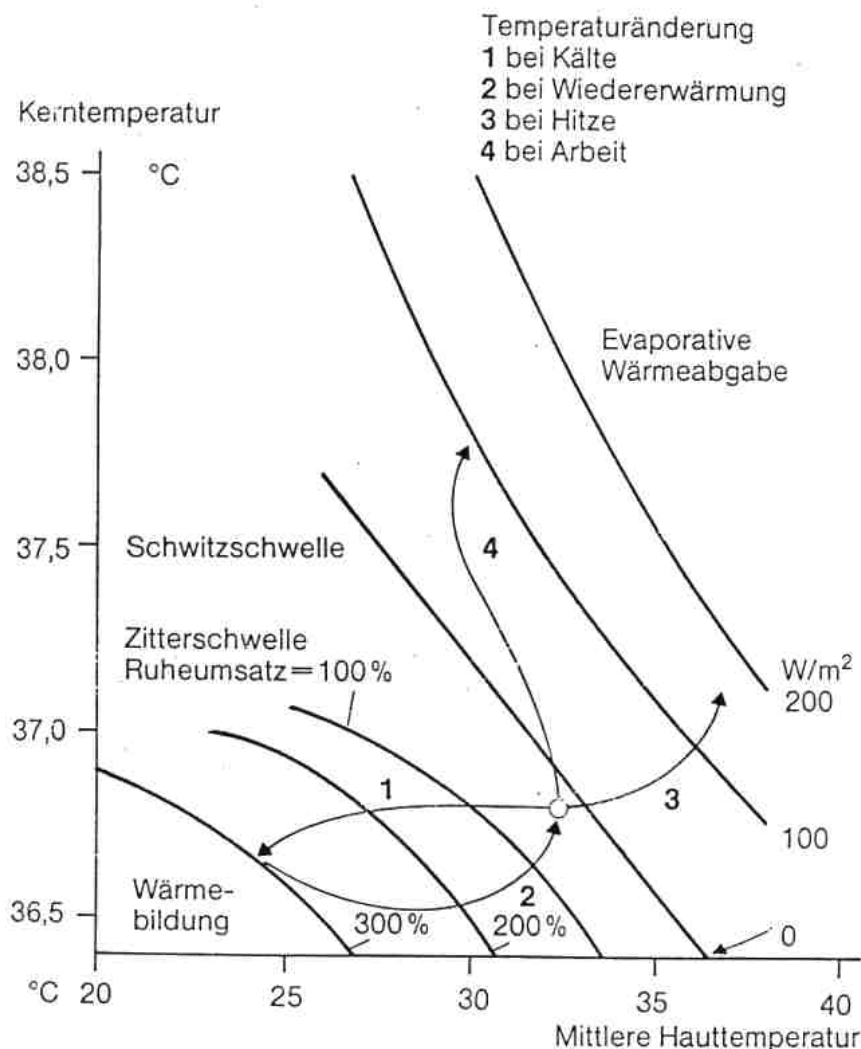


Abb.6 Regulation der Körpertemperatur (aus Schmidt-Thews Physiologie des Menschen 1997).

Wenn mit Beginn der körperlichen Aktivität von der Arbeitsmuskulatur mehr Wärme in den Körperkern einströmt, kommt es über dort liegende Thermorezeptoren zu einer Aktivitätssteigerung von Neuronenpopulationen in Bereichen des vorderen Hypothalamus. Über efferente Pfade werden die oben beschriebenen effektorischen Mechanismen der Wärmeabgabe aktiviert. Sind die entsprechenden Schwellenwerte der Körperkerntemperatur überschritten, beginnt die Vasodilatation der Hautgefäße, die Schweißsekretion setzt ein. Hautdurchblutung und Schweißproduktion steigen proportional an mit Zunahme der Körperkerntemperatur. Die Abb.6 verdeutlicht beispielhaft vier verschiedene Temperaturveränderungen (Kern- und Schalentemperaturen) bei Kälte, Wiedererwärmung, Hitze und Arbeit.

Pfeil 1 in Abb.6 zeigt den Abfall der Hauttemperaturen (Abszisse) bei **Kälteexposition**. Durch Vasokonstriktion der aussen liegenden Blutgefäße und Steigerung des Ruheumsatzes um das bis zu Vierfache, kann ein Abfall der Körperkerntemperatur für eine bestimmte Zeit verhindert werden.

Bei einer **Aufwärmung** des Organismus **durch Strahlungswärme** (z.B. Sonnenbad) (**Pfeil 2 in Abb.6**) steigt die Hauttemperatur zunächst an.

Eine dadurch hervorgerufene verstärkte Durchblutung der Körperschale bewirkt eine gesteigerte Wärmeabgabe (Frieren) mit der Folge, daß die Körperkerntemperatur abfällt („after drop“).

Bei **äußerer Erwärmung** steigt zunächst nur die Hauttemperatur an (**Pfeil 3**). Übersteigt die mittlere Hauttemperatur 36°C , versucht der Körper durch verstärkte Evaporation (Schwitzen) die Wärmeabgabe des Organismus zu steigern.

5.6.1 Temperaturregulation bei körperlicher Arbeit

Den Verlauf von Körperkern- und Körperschalentemperatur bei Arbeit gibt der **Pfeil 4 in Abb.6** wieder. Hier kommt es zunächst zu einem raschen Anstieg der Kerntemperatur durch die Wärmeproduktion der arbeitenden Muskulatur. (Die Wärmeproduktion steigt gegenüber den Ruhewerten (70-100W) auf das bis zu 10-20-fache).

Die Schwitzschwelle wird rasch überschritten und es kommt durch die verstärkten evaporativen Wärmeabgabe zur Abkühlung der Körperschale (die Evaporation ist hier der dominierende Wärmeabgabemechanismus). Damit entsteht ein größerer thermischer Gradient zwischen Kern und Schale, wodurch sich der innere Wärmestrom nach Aussen verstärkt. Schwitzen belastet den Salz und Wasserhaushalt des Organismus. Mit dem Wasserverlust verringert sich aber das Blutvolumen und damit die innere Wärmetransportkapazität. Bei Dehydration kommt es so zu einem Anstieg der Kerntemperatur (Ein Liter Wasserverlust bewirkt eine Temperaturerhöhung von ca. $0,5^{\circ}\text{C}$).

Die Temperatur der Arbeitsmuskulatur steigt je nach Aktivität auf $34 - 41^{\circ}\text{C}$, sodass die Leistungsfähigkeit und der Wirkungsgrad zunimmt.

Mit steigendem Energieumsatz (und damit größeren Sauerstoffverbrauch) erhöht sich langsam die Körperkerntemperatur. In der Literatur findet man Angaben, daß bei 50% des maximalen Sauerstoffverbrauchs die Kerntemperatur um ca. 1°C ansteigt.

Die Leistungsgrenzen bei thermischer Belastung sind gegeben

1. durch Überlastung der Herz-Kreislaufregulationsmechanismen:
Es kommt zu einer Begrenzung bzw. Reduktion des Herzminutenvolumens (HZV) und damit auch des Sauerstoffangebots. ($\text{HZV} = \text{Hf} \times \text{SV}$). Durch die thermisch bedingte Vasodilatation wird das Blutvolumen nach peripher verschoben. Folge ist ein geringerer venöser Rückstrom. Damit sinkt aber das Schlagvolumen (SV). Die maximale Schlagfrequenz des Herzens (Hf) ist begrenzt.)
2. durch Wasser- und Elektrolytverlust:
Bei Wasserverlust kommt es zu abnehmender körperlicher und geistiger Leistungsfähigkeit
Bei Elektrolytverlust kommt es zu Schwäche, Muskelkrämpfen, Erbrechen, Schwindel und schließlich zum Kollaps.

Der Arbeitsversuch im Praktikum soll die beschriebenen Mechanismen des Wärmehaushalts und der Temperaturregulation am ruhenden und aktiven Menschen verdeutlichen.